

2024 年 7 月 24 日

早稲田大学

甲南大学

科学技術振興機構（JST）

若い超新星残骸 SN1006 で「磁場増幅」の証拠を発見 ～宇宙線加速のジレンマ解消にむけ、新たな一歩～

発表のポイント

- 若い超新星残骸 SN1006 の電波と X 線の観測データを詳細に解析
- 電波スペクトルの折れ曲がりと衝撃波の厚みから、100 倍以上の磁場増幅を発見
- 超新星残骸での宇宙線加速を示唆する、新たな証拠を提示

早稲田大学大学院先進理工学研究科の田尾 萌梨（たおもえり、修士課程 1 年）と、同大学・理工学術院の片岡 淳（かたおかじゅん）教授らの研究グループは、甲南大学理工学部の田中 孝明（たなかたかあき）准教授と共同で、約 1000 年前に爆発した超新星残骸 SN1006 で生ずる衝撃波で、磁場が 100 倍以上も増幅される確実な証拠を突きとめました。

我々の宇宙には「宇宙線」と呼ばれる高エネルギーの粒子が満ちており、その起源は謎に包まれています。宇宙線のスペクトルは 10^{15} 電子ボルト（1 ペタ電子ボルト：1PeV）に特徴的な折れ曲がりを持ち、それ以下の宇宙線は超新星爆発で生成されるとする説が有力です。ところが、加速される宇宙線の最大エネルギーは磁場に比例し、弱い星間磁場（1~10 マイクロガウス： 10^{-6} ~ 10^{-5} G）では 1PeV まで粒子を加速するのは困難で、未解決の難問（ジレンマ）となってきました。今回、研究チームは超新星残骸 SN1006 の衝撃波で磁場が 100 倍以上も増幅されていることを発見し、PeV のエネルギーを持つ宇宙線でも加速できる示唆を得ました。

本研究成果は、2024 年 7 月 24 日（水）（英国夏時間）に『Astrophysical Journal Letters』のオンライン版で公開されます。

【論文情報】

雑誌名：Astrophysical Journal Letters

論文名：Observational Evidence for Magnetic Field Amplification in SN 1006

DOI：10.3847/2041-8213/ad60c7

(1) これまでの研究で分かっていたこと

我々の宇宙には「宇宙線」と呼ばれる高エネルギーの粒子が満ちており、観測史上、最も高いエネルギーでは 10^{20} eV (eV は電子ボルト。エネルギーの単位) を超える粒子の存在が知られています。スイス・ジュネーブにある、人類最高の加速器 Cern-LHC ですら加速できる粒子のエネルギーは 10^{13} eV であることから、宇宙にははるかに効率が良い、未知の「巨大加速器」が、そこかしこに眠っていることになりす。

宇宙線のスペクトルを詳細に見ると、

図 1 のように 10^{15} eV (1PeV) 付近に特徴

的な折れ曲がりがあります。この構造は人間の体にたとえ、「knee (ひざ)」と呼ばれています。これまでの研究から、knee 以下の宇宙線は我々の銀河系の中で生成され、knee 以上の粒子は銀河系の外から到来すると考えられています。とくに、knee 以下の宇宙線は星が最期におこす大爆発（超新星爆発）で、効率よく加速されると考えられています。実際、銀河系内で超新星爆発は約 30 年に 1 度の頻度で起きており、その都度 10^{44} ジュール (J) ものエネルギーを解放します。このうち 1% でも宇宙線加速に消費されれば、エネルギー収支としては十分に賄える計算となります。

ところが、個々の粒子を knee まで加速することは、簡単ではありません。衝撃波加速の理論では、加速される粒子の最大エネルギーは

$$E_{max} = 0.004 \eta^{-1} \left(\frac{B}{1 \mu G} \right) \left(\frac{v_{sh}}{3000 \text{ km/s}} \right)^2 \left(\frac{T_{age}}{1000 \text{ yr}} \right) [\text{PeV}] \quad [\text{式 1}]$$

と表されます。ここで、磁場強度が星間空間と同程度であれば $B \sim 1 - 10 \mu G$ (μG は $10^{-6} G$ 。磁場の大きさ)、 η は 1~10 程度の定数です。若い超新星残骸では年齢が概ね 1000 年 ($T_{age} \sim 1000 \text{ yr}$)、衝撃波の速度は概ね数千 km/s ($v_{sh} \sim 1000 - 3000 \text{ km/s}$) のため、最大エネルギー E_{max} は 1PeV に遠く及ばない計算となります。Knee に到達するには、100 倍から 1000 倍も強い磁場が必要なのです。

これまで多くの若い超新星残骸では電波からガンマ線にわたる観測が行われ、多波長スペクトルからそこでの磁場は星間磁場と同程度の $B \sim 10 \mu G$ が示唆されます。一方で、若い超新星残骸 RXJ1713.7-3946 ($T_{age} = 1600 \text{ yr}$) とカシオペア A ($T_{age} = 300 \text{ yr}$) では、X 線で明るく示される「ホットスポット」が数年の間に点滅する様子が確認されました (※1)。ここで、X 線 (keV: キロ電子ボルト程度) は、衝撃波で加速された電子のシンクロトロン放射 (※2) と考えられ、放射で冷える時間は

$$T_{cool} = 1.5 \left(\frac{B}{1 \text{ mG}} \right)^{-1.5} \left(\frac{E}{1 \text{ keV}} \right)^{-0.5} [\text{yr}] \quad [\text{式 2}]$$

で与えられます。つまり、X 線の点滅はミリガウス ($1 \text{ mG} = 1000 \mu G$) の強い磁場を示唆しますが、スペクトルから求めた磁場 ($10 \mu G$) とは大きく矛盾します。また、ほかの超新星残骸では磁場増幅の兆候は見つかっていません。この混沌とした状況に、多くの研究者が頭を悩ませてきました。

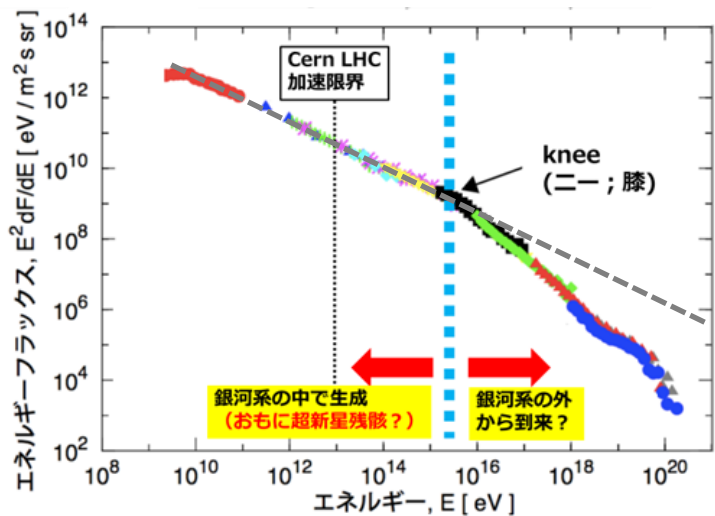


図 1：宇宙線スペクトルの概観と「knee」

(2) 今回の研究で明らかになったこと

本研究では、超新星残骸の「プロトタイプ」とも呼べる SN1006 に着目し、多波長スペクトルと画像解析から磁場増幅と宇宙線加速の謎に挑みました。

SN1006 は、その名の通り西暦 1006 年に出現した超新星で、距離は太陽系から約 6000 光年で「おおかみ座」の方向にあります。爆発時には -7.5 等級まで明るくなったことが知られています。これは歴史上最も明るく、昼間でも見ることができた明るさで、藤原定家の「明月記」、中国の「宋史」にも記載があります。

約 1000 年経った現在における SN1006 の姿を図 2 に示します。電波や X 線では縁部（シェル）が明るい美しい球状の構造を持ち、まさに爆発による衝撃波が、星間空間を対称に広がっていく様子が見て取れます。

1995 年には日本の天文衛星「あすか」で初めて精密な X 線分光観測が行われ、明るいシェルの部分は強いシンクロトン放射であることが確認されました。これは超新星爆発で、実際に衝撃波加速が起きている動かぬ証拠です (※3)。その後のチャンドラ衛星（米国）、ニュートン衛星（欧州）の詳細観測では、X 線の衝撃波面が 10 秒角（地球までの距離 6000 光年から計算して、実際の厚みは ~ 3 光年）程度ときわめて薄いこと、また電波も X 線も $B \sim 10 \mu G$ の磁場中で生ずる、一連のシンクロトン放射である、とする統一見解が得られました。しかしながら、この程度の磁場強度では、SN1006 で PeV までの宇宙線加速はできないはず (【式 1】を参照)。

本研究は以下のアプローチで、この難問の解決に挑みました：

- (A) Planck (プランク) 衛星を加えた 1-100GHz の広帯域電波スペクトル解析
- (B) MeerKAT 望遠鏡とチャンドラ衛星による高解像度の電波/X 線画像の直接比較
- (C) 多波長スペクトル解析による検証

(A) Planck 衛星は、ヨーロッパ宇宙機関 (ESA) が打ち上げたマイクロ波背景放射を観測する衛星で、これまで観測できなかった数十 $\sim$ 100GHz (GHz は 10^9 Hz) での電波観測を行うことが可能です。本研究では既存の電波望遠鏡の観測結果とあわせることで、初めて 1-100GHz の広帯域電波スペクトルを導出しました。結果を図 3 に示します。これまで、電波のスペクトルは折れ曲がりなく一直線に X 線まで伸びると信じられてきましたが、本研究で $\nu_{brk} = 36 \pm 6$ GHz に折れ曲がりがあることが分かりました (※4)。これは、電子が強

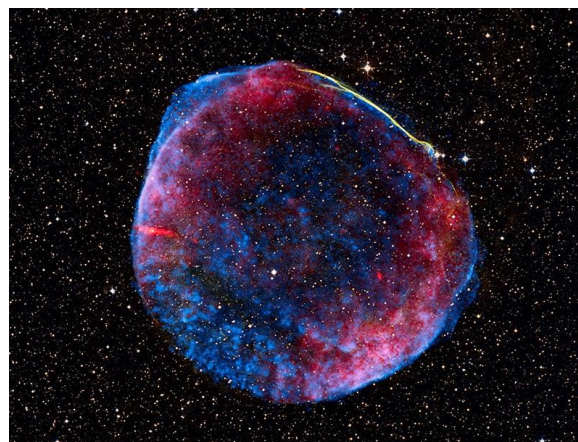


図 2：超新星残骸 SN1006。青はチャンドラ衛星による X 線観測、赤は電波観測、黄色は可視光による観測の合成画像 (©NASA)

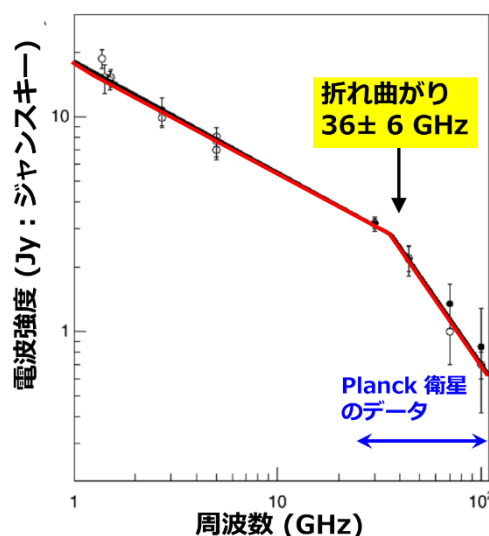


図 3：広帯域電波スペクトル。30GHz 以上が Planck 衛星のデータ

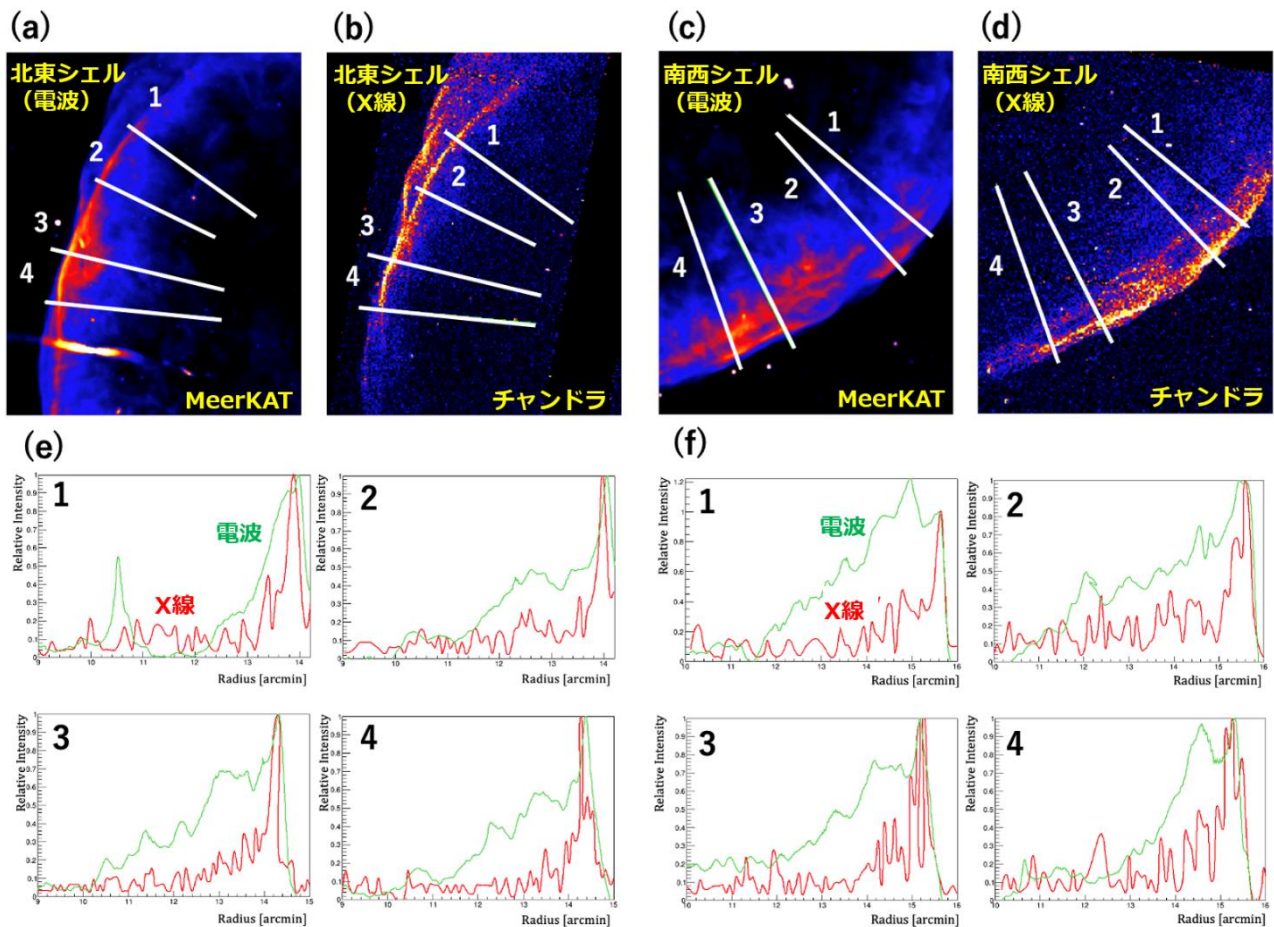


図4 : (a)-(d) SN1006 の北東シェル、南西シェルの電波、X線画像の比較 (e)-(f) それぞれ1-4の白線に沿って作成した電波（緑色）とX線（赤色）の断面図。電波のシェルはX線より太いが、高々10倍程度であることが分かる

い磁場中で急激にシンクロトロン放射によりエネルギーを失う結果と考えられます。折れ曲がりの周波数は磁場の強さと超新星残骸の年齢 ($T_{age} = 1000 \text{ yr}$) に依存するため、ここから電波放射に寄与する磁場の下限値 $B > 2mG$ が得られました。

(B) 続いて、超高解像度の電波画像とX線画像を直接比較し、SN1006の衝撃波面の厚みを比較しました。MeerKAT望遠鏡は南アフリカに設置された口径13.5メートル、64台からなる電波望遠鏡群で、1.4GHzの観測帯で過去最高の解像度（8秒角）を誇ります。一方で、チャンドラ衛星はX線領域で過去最高の解像度（0.5秒角）を持ち、これらの画像を直接比較することで新たな示唆が得られると期待されます。ここで、電波とX線は、エネルギー（または波長）にして8桁（約1億倍）もの開きがあることに注意が必要です。衝撃波面の厚みは、衝撃波の速度 v_{sh} と電子の冷却時間 T_{cool} の積で与えられるため、もし電波とX線が同じ磁場強度を持つシンクロトロン放射であるならば、**【式2】**より電波の厚みはX線よりも10,000倍も「厚い」はずですが、その場合、電波ではシェル構造が見えず、全体がほぼ一様な球のように光って見えると考えられます。ところが図4を見ると、電波でも明るいシェルが見られ、X線との厚みの違いは高々10倍程度であることが分かります。これは、電波に寄与する磁

場が X 線領域よりもずっと強く、非常に速く冷却しているからに他なりません。この事実からも、電波に寄与する磁場の下限値 $B > 2mG$ が得られます。一方で、X 線を出す電子はエネルギーが高いため、 $B \sim 10\mu G$ で観測されたシェルの厚みを説明することが可能です。

(C) 上記では SN1006 で電波を出す領域の磁場の強さが非常に強く、かつ X 線を出す領域の磁場とは全く異なる可能性を示しました。

それでは最後に、電波からガンマ線をつなぐ多波長スペクトルから SN1006 で何が起きているのか、謎解きをしてみたいと思います。図 5 は、今回新しく解析した広帯域の電波スペクトル（図中青色）を加えた多波長データとなります。ここではさらに、可視光・紫外線の過去の観測から見積もった強度（図中黒丸）を新たに加えています。ここで、電波から X 線は高エネルギー電子のシンクロトロン放射と考えられますが、今回検出された折れ曲がりのある第 1 成分（図中緑：ホットスポット）、さらには可視・紫外線と X 線で滑らかにつながる第 2 成分（図中ピンク：全体平均）が混在していることが分かります。第 2 成分については、高エネルギーのガンマ線放射（同じ電子からの放射だが、逆コンプトン放射（※5）という別な放射）との強度比から、磁場が約 $10 - 20 \mu G$ と正確に求められました。これは従来の観測から得られる示唆と矛盾せず、また他の超新星残骸で信じられている磁場の強さでもあります。一方で、第 1 成分の電波放射を作るには、約 100 倍以上磁場が強められることが必要です。つまり、電波と X 線では放射に主に寄与する磁場の強さが全く異なる、すなわち放射領域が異なることが初めて示されました。

(3) 研究の波及効果 — 宇宙線加速の謎解明へ

超新星残骸における磁場増幅は、宇宙線加速の観点からも極めて重要な問題です。今回の発見で超新星残骸 SN1006 のシェルには、磁場が 100 倍以上に増幅された領域が混在し、それが電波スペクトルの「折れ曲がり」と同時に「細いシェル」を説明することが分かりました。一方で、磁場強度が違うにも関わらず、電波と X 線で観測されるシェル構造が似通っているのは何故でしょうか？ また、他の若い超新星残骸 RXJ1713.7-3946 やカシオペア A で観測されたホットスポットの点滅は、SN1006 では見えないのでしょうか？ ここではその原因を考察します。

まず、電波と X 線の画像が似ていることは、磁場が 100 倍以上も増幅された領域がシェルに沿っ

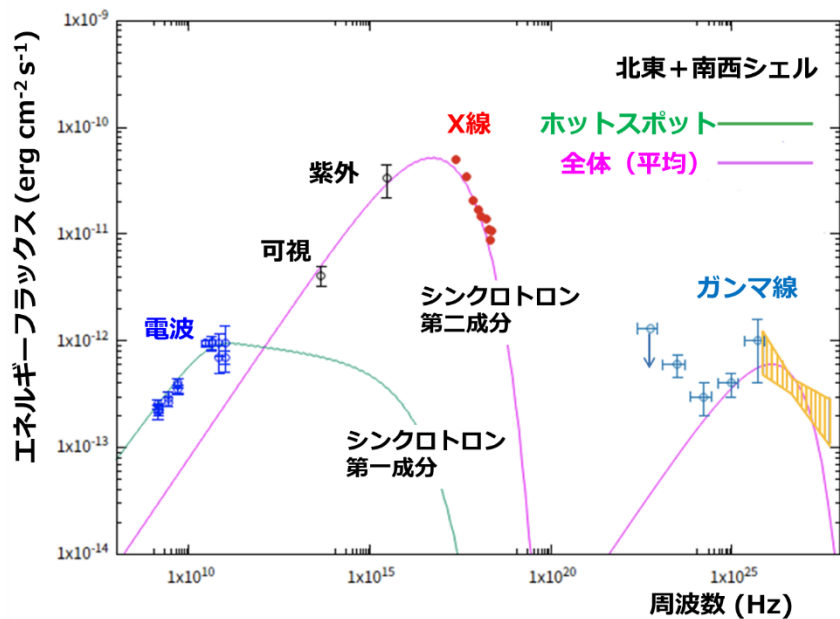


図 5 : SN1006 の電波からガンマ線にわたる多波長スペクトル。電波と X 線はシンクロトロン放射と考えられるが、別の成分で滑らかにつながらないことが分かる

て、ほぼ一様に広がっていることを示唆します。これらは衝撃波面に沿ってパッチ（ホットスポット）のように点在している可能性もありますし、極めて薄いシート状に広がっているのかもしれませんが。シンクロトロン放射の強度は磁場の2乗に比例するため、大まかに磁場増幅された領域の体積を見積もることができます。SN1006 の場合、シエル全体の10万分の1程度しかないはずです。このような小さな（あるいは薄い）領域は、チャンドラ衛星の解像度をもってしても画像で分解することができません。また、仮に分解できたとしても、 $\nu_{brk} = 36 \pm 6 \text{ GHz}$ で折れ曲がった第1成分が、果たしてX線まで伸びているかも定かではありません。もちろん、今後の観測で、RXJ1713.7-3946 やカシオペア A で観測された時間変動が見られれば、より強い制限を与えられることになります。

最後に、図4で求めた電波とX線の画像から、さまざまな位置で電波とX線のシエルの厚みを比較したプロットを図6に示します。全てのシエル領域で、磁場の増幅が見られ、増幅率は100–300倍程度であることが分かります。超新星残骸のプロトタイプともいえるSN1006で磁場増幅の確かな証拠が得られたことで、宇宙線加速の長年の謎であった「超新星残骸ではPeVまで加速できない？」問題に、重要かつ新たな示唆が得られたことになります。

（4）今後の課題

本研究では、有名な超新星残骸SN1006に対し、Planck衛星の広帯域電波観測、またMeerKAT電波望遠鏡、チャンドラ衛星を総動員した最先端の観測を駆使し、超新星残骸の磁場増幅、さらには宇宙線

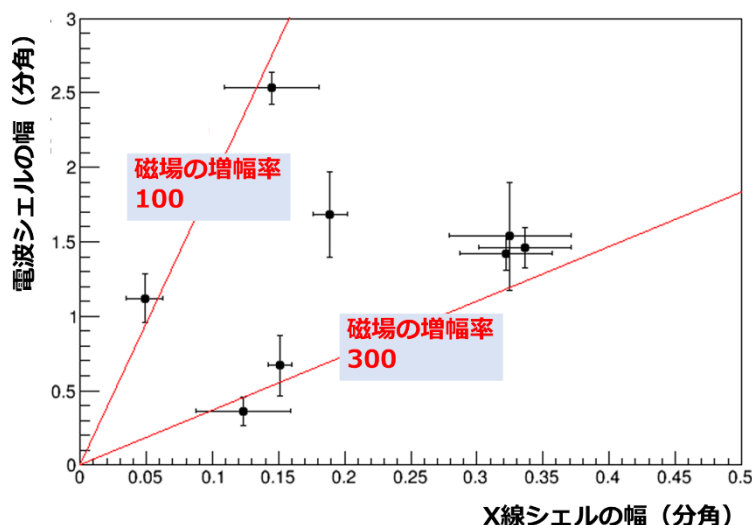


図6：電波とX線のシエルの幅（図4）から求めた、衝撃波面での磁場圧縮率。場所ごとに差はあるが、概ね100~300倍に圧縮していることが分かる

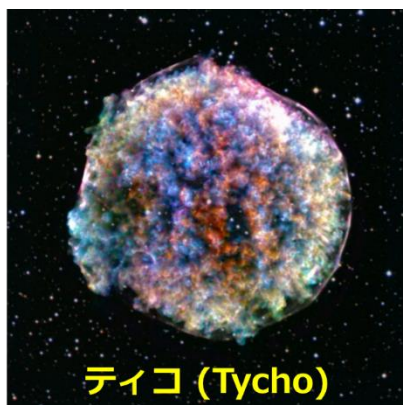


図7：現在、解析を進めているSN1006以外の若い超新星残骸の例

加速の問題に迫りました。もちろん、SN1006 以外にも若い超新星残骸はたくさんあります。たとえば 1604 年に爆発したケプラー（Kepler）、1572 年に爆発したティコ（Tycho）はチャンドラによる X 線観測で細いシェルが明確に見えており（図 7）、MeerKAT を用いた同様な電波画像との比較が待たれます。また、約 3700 年前に爆発した Puppis A は Planck 衛星による電波観測で折れ曲がりが見えており、これらと SN1006 の比較も重要な課題です。今後、研究チームではより広範な種類と年齢の超新星残骸で、磁場増幅の検証を行っていく予定です。

（５）研究者のコメント

宇宙を飛び交う高エネルギー粒子「宇宙線」は 1912 年に、オーストリアの研究者 ヘス（V. HESS）による気球実験で発見されました。大型の加速器が作れない当時、宇宙線を利用した研究は素粒子物理学の花形で、多くの発見をもたらしました。そして 100 年以上を経た現在、いまだに人類は自然界を超える加速器の製作に成功しておらず、また宇宙のどこで・どのように宇宙線が生成されるのかは、物理学・天文学共通の最重要な研究テーマとして君臨しています。今回の研究は、超新星残骸 SN1006 に着目したのですが、研究チームが開発した「スペクトルと画像を多波長で横断するアプローチ」は、超新星残骸以外のさまざまな天体への応用が可能で、宇宙に隠れた加速器の真の姿を照らしてくれるに違いありません。今後の研究にご期待ください。

（６）用語解説、参考文献

※1 若い超新星残骸で見つかった、X 線ホットスポットの強度変化：

- ・ “Extremely fast acceleration of cosmic rays in a supernova remnant”, Uchiyama, Y., Aharonian, F. A., Tanaka, T., Takahashi, T., & Maeda, Y. (2007), Nature, 449, 576
- ・ “Fast Variability of Nonthermal X-Ray Emission in Cassiopeia A: Probing Electron Acceleration in Reverse-Shocked Ejecta”, Uchiyama, Y., & Aharonian, F. A. (2008), The Astrophysical Journal, 677, L105

※2 シンクロトロン放射

高エネルギーに加速された粒子が、磁場中で出す放射。粒子の質量の 4 乗に比例して放射しづらくなるため、実際に観測されているのは軽い電子によるシンクロトロン放射だけである。

※3 ASCA 衛星による SN1006 の観測

- ・ “Evidence for shock acceleration of high-energy electrons in the supernova remnant SN1006”, K. Koyama, R. Petre, E. V. Gotthelf, U. Hwang, M. Matsuura, M. Ozaki & S. S. Holt, (1995), Nature, 378, 255

※4 SN1006 の電波スペクトルに折れ曲がりがあることは、以下の論文が最初に発表

- ・ “Planck intermediate results: XXXI. Microwave survey of Galactic supernova remnants”, Planck collaboration, (2016), A&A, 586, A134

※5 逆コンプトン放射

高エネルギーに加速された電子が、エネルギーの一部を低エネルギーの光子（SN1006 場合は、宇宙マイクロ波背景放射）に与えることで生ずる、高エネルギーの放射。

(7) 論文情報

雑誌名 : Astrophysical Journal Letters

論文名 : Observational Evidence for Magnetic Field Amplification in SN 1006

執筆者名 : Moeri Tao¹、Jun Kataoka¹ and Takaaki Tanaka²

1. 早稲田大学理工学術院 先進理工学研究科 物理学及応用物理学専攻

田尾 萌梨、片岡 淳 (論文責任著者)

2. 甲南大学理工学部 物理学科

田中 孝明

掲載日時 (英国夏時間) : 2024 年 7 月 24 日 (水)

DOI : 10.3847/2041-8213/ad60c7

掲載 URL : <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad60c7>

(8) 研究助成

本研究は、JST 戦略的創造研究推進事業 ERATO「片岡ライン X 線ガンマ線イメージングプロジェクト」(R3~8 年度 ; グラント番号 JPMJER2102) および科学研究費補助金 基盤研究 (B)「超新星残骸で加速される宇宙線総量の測定と粒子加速における注入問題の解決」(R2~5 年度 ; グラント番号 19H01936) の支援を得て実施したものです。

【研究内容に関するお問い合わせ先】

早稲田大学理工学術院 先進理工学研究科 物理学及応用物理学専攻

教授 片岡 淳

Tel : 03-5286-3224 E-mail : kataoka.jun[at]waseda.jp

甲南大学 理工学部 物理学科

准教授 田中 孝明

Tel : 078-435-2487 E-mail : ttanaka[at]konan-u.ac.jp

【JST 事業に関するお問い合わせ先】

科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部 グリーンイノベーショングループ

永井 諭子

Tel : 03-3512-3528 E-mail : eratowww[at]jst.go.jp

【発信元】

早稲田大学 広報室広報課

Tel : 03-3202-5454 E-mail : koho[at]list.waseda.jp

甲南大学 (甲南学園 広報部)

Tel : 078-435-2314 E-mail : kouhou[at]adm.konan-u.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 E-mail : jstkoho[at]jst.go.jp